

文章编号:1671-9352(2011)10-0066-09

冕流波及其冕震学应用研究综述

陈耀¹,冯士伟¹,宋红强¹,李波¹,孔祥良¹,夏利东¹,李醒²,李刚^{3,1}

(1. 山东大学空间科学研究院, 山东大学威海分校空间科学与物理学院, 山东 威海 264209;

2. 亚伯里斯威斯大学数学与物理研究所, 英国 威尔士;

3. 阿拉巴马汉茨维尔大学物理系, 空间等离子体与高层大气物理研究中心, 美国 阿拉巴马)

摘要:综述了我们近两年来在冕流波(Streamer Waves)现象研究方面的进展。冕流波是由日冕物质抛射(CME)和冕流结构相互作用所激发的、沿等离子体片向外传播的波动过程,是迄今发现的最大尺度的日冕波动现象。冕流波被解释为由冕流等离子体片片状结构所支持的快体积扭曲模式。基于这一理解,我们结合有关的太阳风速度和数密度方面的观测限制,发展了一种新的冕震学方法,可利用波动参数的观测结果推断冕流等离子体片区域在3-10太阳半径范围的阿尔芬速度和磁场强度的径向剖面。我们还在第23太阳活动周内找到了8例较好的CME-冕流摆动事件,其中5例被认定为冕流波事件。比较这些事件发现,导致冕流波激发的CME都具有很高的喷发速度和角宽度,CME与冕流大都从侧面发生相互作用,且作用的最初位置大都位于C2视场的底部或下方,所有正面CME均伴有耀斑现象。这些共同观测特征为我们理解冕流波的激发条件提供了线索。

关键词:日冕;日冕物质抛射;冕流波;冕震学

中图分类号:P354.3; P353.7; P182.2; P182.9

文献标志码:A

A review on streamer waves and associated coronal seismological study

CHEN Yao¹, FENG Shi-wei¹, SONG Hong-qiang¹, LI Bo¹, KONG Xiang-liang¹,
XIA Li-dong¹, LI Xing², LI Gang^{3,1}

(1. Institute of Space Science, Shandong University, School of Space Science and Physics,
Shandong University at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China;

2. Institute of Mathematics and Physics, Aberystwyth University, SY23 3BZ UK;

3. Department of Physics and CSPAR, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, USA)

Abstract: In this paper, we reviewed our latest studies on a newly-discovered phenomenon dubbed “streamer waves” which are excited in the aftermath of CME-streamer interaction. Streamer waves represent one of the largest wave phenomena ever observed in the solar corona. The wave mode is interpreted as the fast kink body mode supported by and propagating outwards along the plasma sheet of the streamer. With the white light coronagraph data and available observational constraints on the solar wind parameters, we develop a novel seismological technique to diagnose the radial profiles of the Alfvén speed and magnetic field strength in the region surrounding the plasma sheet structure from 3 to 10 solar radii. We also conduct a data survey searching for well-defined streamer wave events observed by the SOHO/LASCO coronagraph throughout Solar Cycle 23. As a result, eight candidate events were found. We compare different events and find that in most of them the driving CMEs’ ejecta were characterized by high speed and wide angular span, and the CME-streamer interactions generally occurred along the flank of the streamer structure at an altitude no higher than the bottom of the field of view of LASCO C2. In addition, all front-side CMEs had accompanying flares. These common observational features shed light on the excitation conditions of streamer wave events.

Key words: corona; coronal mass ejections; streamer waves; coronal seismology

收稿日期:2011-08-04; 网络出版时间:2011-08-12 09:43

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/37.1389.N.20110812.0943.002.html>

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40825014, 40890162, 40904047(李波), 40974105(夏利东), 41028004(李刚));高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金(2007B24);山东省自然科学基金资助项目(ZR2010DQ016(宋红强))

作者简介:陈耀(1975 -),男,教授,博士生导师,主要研究方向为日地空间物理学,空间天气学,特别是太阳爆发现象及其空间天气学效应。

Email: yaochen@sdu.edu.cn

0 引言

太阳的外层大气,称为日冕,是由处于完全电离状态的百万度高温等离子体构成的,其中含有电子、质子、 α 粒子和具不同电离态的氧、碳、铁、镁等痕量元素。日冕等离子体与源自太阳内部并延伸至整个日球层边界的磁场发生强烈相互作用,形成了由现代科学仪器观测到的丰富多姿的物理现象。

通常,日冕中发生的物理过程是无法用肉眼或常规天文望远镜进行观测的。这主要是由于:日冕辐射亮度非常之微弱,大概仅为光球表面亮度的百万分之一。为了能够观测到日冕中的动力学过程,法国人 Lyot 于 1930 年发明了日冕仪——即人造日全食设备,借助于一挡板遮住太阳附近光球和低日冕区的强光,而突显出外日冕区(大约离日心 $1.5-2 R_{\odot}$ 之外, R_{\odot} 表示太阳半径)的辐射结构。本文研究所使用的数据便主要来自于 1995 年发射、至今仍在运行的太阳和日球观测卫星(Solar and Heliospheric Observatory: SOHO)上所搭载的大角度分光日冕仪

(Large Angle and Spectrometric Coronagraph: LASCO)^[1]。通过日全食时短暂的、日冕仪长年持续的观测分析,人们已经熟知日冕中的不同类型的准稳态结构与瞬变过程。其中,日冕中最明显的大尺度准稳态结构便是本文的主要研究对象:冕流,又称为盔状流(helmet streamer)。图 1 左图给出了一 LASCO C2 日冕仪在 2004 年 7 月 6 日观测到的冕流结构,位于视场右下方;图 1 右图则绘制出一典型冕流结构的磁力线走向,两个分图的比较反映出磁场对日冕结构的控制性作用,而冕流之所以看起来如此之亮则主要是由于闭合磁场对等离子体的约束效果。

由图 1 右图可知,一个典型的冕流结构包含闭合磁场区和外围开放磁场区两部分,闭合区的顶点称为冕流尖点(streamer cusp),下与最外层闭合磁力线相连,上与开放至行星际空间的电流片贯通,冕流闭合力和电流片外围区域被认为是低速太阳风的一个主要源区^[2-4],这些低速太阳风相对于周围同高度太阳风而言密度较高,对应辐射也强一些,使得冕流结构看起来较亮且延展至很远的距离。

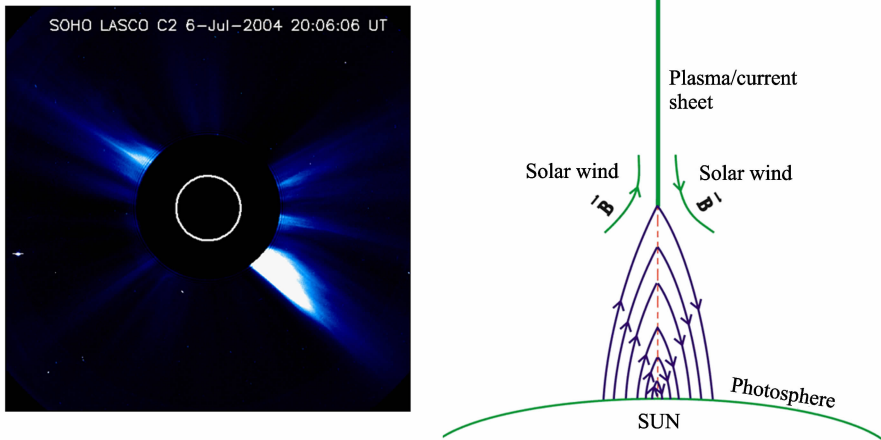


图 1 LASCO C2 日冕仪在 2004 年 7 月 6 日观测到的日冕图像,中心白圈表示太阳光球,外部黑色圆环表示日冕仪挡板,图中右下方存在一明亮的冕流结构;右图绘制出一典型冕流结构的磁力线走向示意图,底部绿色圆弧表示太阳光球表面,图中箭头表示磁场方向,中心红色虚线表示冕流的中心平衡位置,上方绿色直线表示冕流的电流片\等离子体片结构。

Fig. 1 (Left) Coronal white-light images recorded by LASCO C2 on 6 July 2004, the inner white circle represents the solar photosphere, and the outer black circle is the occulting disk of the C2 coronagraph, there exists a bright streamer structure on the lower-right part of the image. (Right) A cartoon illustration of the magnetic field structure of a typical helmet streamer: the arrows denote the direction of the magnetic field, the central dashed red line is the equilibrium position of the streamer, and the upper green line is the streamer current/plasma sheet structure.

日冕中还存在着不同类型的太阳爆发现象。其中,尺度最大的当属日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection: CME)过程,它也是整个太阳系中尺度最大、能量释放最多和最剧烈的一类现象,所释放的能量主要来自于日冕的磁场。太阳爆发所产生的高能粒子、电磁辐射和大尺度的磁化等离子体结构可以

对地球的电磁和粒子辐射环境产生剧烈骚扰,对人类社会与经济可产生重要影响^[5],因而是当前非常热门的前沿学科——空间天气学(Space Weather)的主要研究对象。

我们知道,自然界,特别是一个由等离子体构成的体系,在受到外界扰动时通常会产生振荡或波动

现象。作为最大尺度的日冕准稳态结构——冕流,是否也可能对另一大尺度、引入全球骚扰的 CME 过程产生可观测的振荡或波动现象呢? 本文所介绍的冕流波(streamer wave)现象,便为上述问题提供了一种答案。在讨论具体的观测数据和物理分析之前,我们首先给出冕流波的观测定义:冕流波是 CME 冲撞附近冕流结构而激发的、沿冕流等离子体片向外传播的长周期日冕波动过程,是迄今发现的最大尺度的日冕波动现象^[6]。易知,该定义是由有关观测特征给出的,不涉及我们对波动物理属性的理解。下面的文字将分别叙述这一波动过程的观测表现、形成机制、波动属性和该现象在冕震学方面的应用,最后是我们的总结与讨论。

1 冕流波的观测表现

冕流波现象是由 Chen 等^[6]发现和报道的,他们通过分析 LASCO 的观测数据给出了波动的波

表 1 第 23 太阳活动周八次事件中 CME 和冕流的物理参数

Table 1 Some relevant physical parameters of the CMEs and streamers of the eight candidate streamer wave events

Date[yyy/mm/dd]	Time[UT]	CME				Flares	Streamer CPA [deg]
		CPA[deg]	Width[deg]	Speed[km · s ⁻¹]			
20010420	10:06:05	65	127	1 160	/	15	
20030527* (20030528)	23:50:05 (00:50:05)	Halo/S (Halo/BA)	360 (360)	964 (1 366)	X1.3 (X3.6)	185 (185)	
20030605	20:06:05	230	239	1 458	/	316	
20031118*	08:50:05	Halo/BA	360	1 660	M3.9	319	
20040705*	23:06:05	Halo/BA	360	1 444	/	225	
20040706	20:06:06	Halo/BA	360	1 307	/		
20050115	23:06:50	Halo	360	2 861	X2.6	240	
20061106	17:54:04	80	80	1 994	C8.8	128	

注:(1)-(6)列分别为 CME 首次在 C2 中出现的日期、时间、CPA/角宽度(与 Halo CME 事件的类型)、线性速度、伴随耀斑级别。第(7)列为冕流波 5 R_{\odot} 处的 CPA。有关数据主要根据 CDAW 数据中心提供的资料获取。“*”号事件表示可能受到 CME 尾随结构干扰的疑似事件。

根据该表数据,我们可以总结出此类事件的一些共同特征:(1)有关 CME 的速度都很快(平均线性速度为 1 530 km/s),CME 的角宽度都很宽(6 个为晕状(Halo) CME);(2)所有正面 CME 均伴随有耀斑事件,这说明爆发过程中可能总有磁场重联发生;(3)在大多数事件中,CME 由冕流结构的一侧推挤冕流,而且 CME 的抛射体看上去与冕流结构有直接的接触;冕流与 CME 相互作用的初始位置总是位于 C2 视场的底部或以下区域($\leq 2.2 R_{\odot}$)。这些共同特征为我们在后面讨论和理解冕流波的激发条件奠定了观测基础。

为形象地展示冕流波的形成和传播过程,图 2 给出了其中具有代表性的两次事件。图中上列展示

长、周期和传播相速度等信息;在随后一篇文章^[7]中,他们又着重发展了可用来诊断日冕等离子体片区域阿尔芬速度和磁场强度的冕震学方法。关于冕震学方面的意义、具体方法和结果,我们将在第 3 节中加以叙述。以上两篇工作主要针对发生于 2004 年 7 月 6 日的一次事件,在第三篇系列文章^[8]中,他们又进一步给出了在第 23 太阳活动周(1997 年~2008 年)期间观测到的 8 次冕流波疑似事件。这些事件中 CME 和冕流的位置参数在表一中列出。表中第(1)~(6)列分别为 CME 首次在 LASCO C2 中出现的日期、时间、中心位置角(Central Position Angle: CPA)、角宽度(或晕状 CME 事件的类型)、线性速度、伴随耀斑级别,第(7)列为冕流结构在 5 R_{\odot} 处的 CPA。有关数据主要根据 CDAW(Coordinated Data Analysis Workshops)数据中心提供的资料获取,网上可浏览 LASCO 拍摄的所有这些事件的爆发过程(<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>)。

的是 2004 年 7 月 6 日观测到的冕流波事件,该次事件发生之前的冕流形态已经在图 1 中给出。比较可知,图 2a 中冕流的一侧出现一团物质,表示日冕物质抛射即 CME 的爆发体。由表 1 可知,CME 的线性速度为 1 307 km/s。该 CME 从 20:30 分(UT,下同)开始便与邻近冕流发生相互作用,在 C2 视场底部冕流结构便已明显偏离未扰动时的平衡位置,这说明 CME 与冕流相互作用的初始位置位于 C2 视场底部或更低区域。在 20:58 分,CME 已完全离开 C2 视场;冕流开始向原平衡位置摆回,并继而发生往返运动。这种回摆和过冲构成的运动沿着冕流尖点上方的等离子体片向外传播,从而形成了观测到的冕流波现象,该现象使由相邻时刻图像相减得到

的较差图上呈现非常明显的“黑白-白黑”相间结构对。Chen 等^[7]和 Feng 等^[8]便主要根据这些差分结构和白光图像,提取出合适的冕流波波形曲线,并从中确定了波峰(谷)的位置以及不同峰谷相位日

心距离的时变曲线,进而求出波的波长、周期和传播相速度的变化。图2中另一事件发生于2003年6月5日,CME与冕流相互作用的总体形态和发展过程与上述事件大体相似,此处不再赘述。

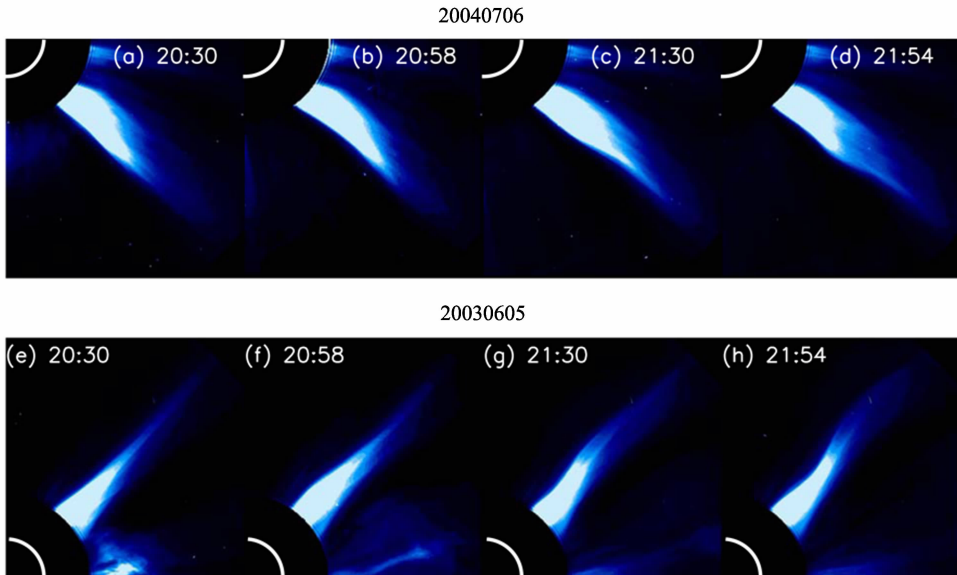


图2 LASCO C2在2004年7月6日和2003年6月5日所观测的两次冕流波事件,日冕仪拍摄时刻均已在图中标出。
Fig. 2 White-light images of the two streamer wave events observed by LASCO C2 on 6 July 2004 and 5 June 2003.

在图3中,我们给出了根据差分图测量出的两次事件中不同峰谷相位的日心距离随时间的变化剖面(a, c),以及对相应剖面做二次曲线拟合后求得的相位传播速度随日心距离的变化曲线(b, d)。图中只给出了高度测量较为准确的前三个相位的传播速度。由图可知,不同相位的传播速度均随日心距离增加而下降,而且尾随相位速度慢于前导相位的速度。例如,在2004年7月6日事件中,相位 P_1 (P_2 , P_3)由 $3R_s$ 处的 $500(430, 440)$ km/s下降至 $7R_s$ 处的 $450(390, 350)$ km/s左右,而在2003年6月5日事件中,相位 P_1 和 P_2 则由 $3R_s$ 处的 435 km/s和 400 km/s分别下降至 $7R_s$ 处的 415 和 380 km/s,相位 P_3 的速度则变化不大。在继续讨论之前,我们分析一下上述结果的测量误差。有关误差主要来自于我们对波振幅最大之处,即波的峰谷相位位置的测量,这主要是基于较差图中的“黑白-白黑”相间结构进行的。一般,欲测量的峰谷相位大体上位于较差结构的中间位置。因此,图3中相位距离的测量误差应不超过相应较差结构的 $1/3$ 到 $1/2$,这可用相应波长的 $\pm 10\%$ (或波长的 20%)来表示。该误差将直接传递到相速度上,产生大约 ± 40 km/s的速度测量误差。这一误差还将传递到波长、周期的测量,以及后面基于相速度测量数据开展的冕震学研究结果上。

可导出波动的波长和周期。为此,我们将波长定义为同一时刻,两相邻波峰相位 P_1 与 P_3 之间的距离;而将周期定义为 P_1 和 P_3 通过同一日心距离的时间之差。图4中同时用实(虚)线给出了针对20040706(20030605)事件的测量结果。我们可以看到,两次事件中两参数大小在相同日心距离上差别不大,而且都表现出类似的随日心距离增加的趋势。例如,20040706(20030605)事件中的波长与周期由 $4R_s$ 处的 $2.0R_s$ 与 50 min($2.4R_s$ 与 70 min)增加至 $8R_s$ 处的 $2.6R_s$ 与 85 min($2.85R_s$ 与 85 min)。波长随冕流波外传而增加可用不同相位的相速度差来解释。例如,由观测结果可知,第一个波动相位 P_1 快于尾随的相位 P_2 和 P_3 ,这使得冕流波在向外传播过程中, P_1 点与 P_3 点之间的距离(即波长)不断增加。对于周期随波传播的变化,由前面所述的波动周期定义可知,同一波长上的相邻波峰(如 P_1 和 P_3)传播相同的日心高度范围(如均由 $4R_s$ 传至 $6R_s$)所消耗的时间之差,对应于波动周期在此高度范围上的变化。由于在同一日心距离上, P_1 快于 P_3 ,这使得波动周期随日心距离增加而增加。这里所讨论的相速度变化是由相应的日冕参数随时间和空间的变化造成的。这些时空变化与下面一节中讨论的冕震学研究的结论是一致的,被认为是CME扰动后的日冕恢复过程的表现。

根据图3左列中峰谷相位随日心距离的变化还

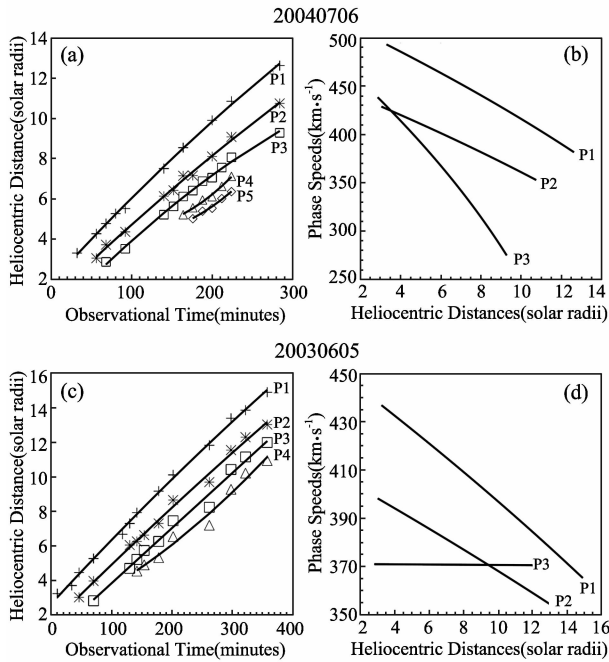


图3 根据差分图所测量出的两次事件中不同峰谷相位的日心距离随时间的变化剖面(a, c),以及对相应剖面做二次曲线拟合后求得的相位传播速度随日心距离的变化曲线(b, d)。左列图中“加号”、“星号”、“正方形”、“三角形”和“菱形”分别表示相位P1~P5的日心距离,实线为二次曲线拟合的结果;右列图中只给出了高度测量误差较小的前三个相位的传播速度。

Fig. 3 Measurements of the two streamer wave events shown in Figure 2. (a, c) Radial variations of heliocentric distances of the wave phases (P1-P4, P5) indicated by plus signs, asterisks, squares, triangles, and diamonds, respectively. The solid lines are given by the second order polynomial fittings to the measurements. (b, d) The fitted profiles of phase speeds for the first three wave phases (P1-P3).

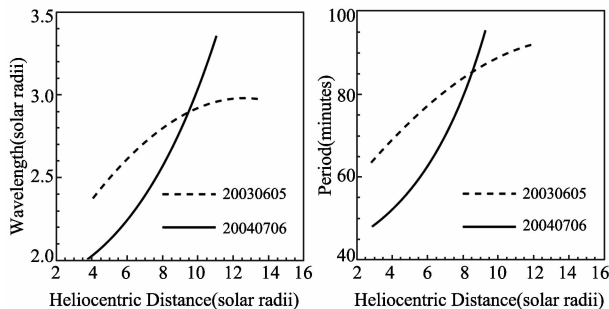


图4 20040706和20030605两次事件中测量得到的冕流波的波长(左)和周期(右)随日心距离的变化

Fig. 4 The deduced radial evolutions of the wavelengths (left) and periods (right) for the 20040706 (solid) and the 20030605 (dashed) events

2 冕流波的形成机制

我们知道,欲了解等离子体波的形成机制,必须认清驱动粒子往返运动的力的物理属性,也就是波动恢复力(restoring force)的物理性质。CME抛射

体的快速膨胀使邻近冕流结构受到推挤,整个结构变形且向一侧偏斜,而由于理想磁流体力学(MHD)的冻结效应,冕流底部的磁力线被紧紧约束在基本固定的光球表面等离子体之上,并不随着上方结构的运动而偏移。因此,冕流偏斜产生了驱动冕流复原的恢复力,该力主要是由受到挤压而变形的冕流磁场结构产生的,可能包括磁压力和磁张力的贡献。观测可知,快速向外运动的CME抛射体很快便离开日冕区域,而冕流结构则在自身磁恢复力的作用下,向原平衡位置移动;到达原平衡位置附近时,磁恢复力消失,而冕流由于惯性继续向另一侧运动,又产生了新的、反方向的恢复力。最后,整体效果就是观测到冕流结构发生“左摇右摆”的运动,力学过程比较类似于儿童玩具“不倒翁”;这种晃动沿着冕流上方的等离子体片开放结构向行星际空间传播,便形成了观测到的冕流波现象。Chen等^[7]也形象地将冕流波物理过程比拟为我国传统舞蹈“彩带舞”,由舞者手持彩带一端左右晃动而产生沿彩带向外传播的摆动。由CME撞击所注入的能量很快随着冕流摆动的向外传播而传递至远处,因此波动的振幅越来越小,也致使只有大约1至2个周期的波形能从日冕仪数据中辨认出来。上述整个物理过程可由图5的3幅卡通形象地演示出来。

现在,我们可以从恢复力的角度来理解上节给出的不同事件之间的共同特征是否和如何有利于冕流波的产生。由上段讨论可知,欲产生较强的磁恢复力,需使冕流结构的偏斜幅度尽可能大;而且偏斜位置要尽可能低,至少位于冕流尖点下方的闭合磁场区,这后一点与上节总结的第三条相符。为了使偏斜幅度足够大,则要求CME的爆发能量足够强,这与观测到的CME很快、很宽,也是一致的;快速CME能够在撞击冕流后迅速离开日冕,也为冕流波的增长提供了足够的时间;另外,所有事件中均观测到耀斑发生,表明磁重联的发生,这使得在CME抛射体下方拉扯出的磁力线能够快速闭合返回日面,进而使冕流在回摆过程中不会受到很强的阻碍。由此可见,上面给出的不同冕流波事件的共同观测特征似乎都可理解为利于冕流波激发的物理条件。

3 冕流波的波动属性与冕震学应用

由上面讨论可知,冕流波是由CME碰撞冕流结构激发的、沿等离子体片向外传播的波动模式。等离子体片是高密度的开放磁场结构,两侧数密度

迅速降低,这点可从日冕仪观测数据中等离子体片边缘的亮度变化看出。这种密度分布构成了类似于“三明治”的片状结构,此类位形所能承载的波动模式已经在30年前由 Edwin & Roberts^[9]在合理假设下做了线性分析。他们发现,从传播速度上可将有关波动模式区分为快(fast)模和慢(slow)模,而

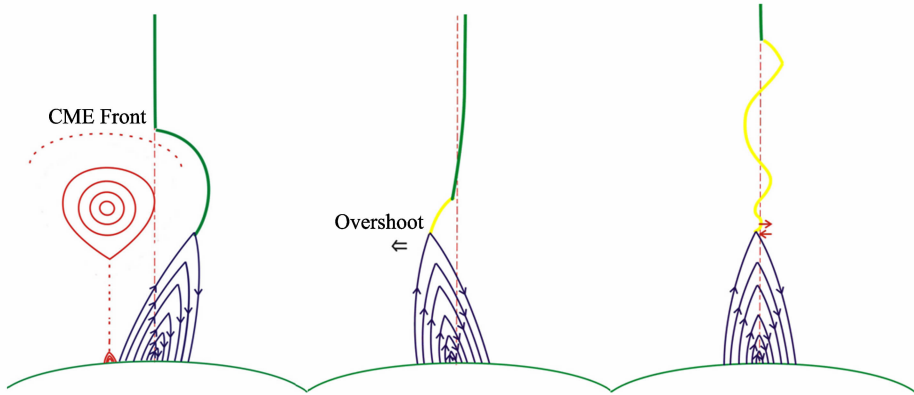


图5 CME-碰撞冕流激发冕流波过程的示意图。图中红色闭合曲线代表CME抛射体,上方点线表示CME前沿,下方点线表示CME尾随电流片结构和有关的耀斑后环。中心红色划线表示冕流的初始平衡位置,黄线表示冕流波的波形曲线。
Fig. 5 A cartoon illustration of the streamer wave excitation in the aftermath of CME-streamer interaction. The red loops represent the magnetic topology of the CME ejecta, the upper dotted line is the CME front, the lower dotted line is the current sheet in the wake of CME, the central dashed red line gives the equilibrium position of the streamer, and the yellow thick line delineates the radial profiles of the streamer wave.

Edwin & Roberts^[9]给出了该扭曲模满足的色散关系,表明模式传播的相速度是由片状结构内外区域物理参数所定出的特征速度(如声速和阿尔芬速度)决定的。需要注意的是,冕流波是在等离子体片区域的太阳风流体中传播的,因此,图3给出的冕流波相速度是太阳风流速与等离子体静止坐标系中扭曲模式的相速度之和。该区域太阳风的速度可以根据观测到的冕流团(streamer blobs)的速度测量统计结果估算出来^[2,4,10-11],在减去太阳风速度之后,才得到等离子体静止坐标系中扭曲模的相速度。Chen等^[7]假定了18组不同的日冕等离子体参数,代入色散关系中求解,求出各组参数所对应的扭曲模相速度与等离子体片外沿区域阿尔芬速度之间的大小关系。他们发现,在所关心的波长数值和等离子体片的宽度范围内,可将前一速度表示为后一速度乘以一个小于但非常接近于1的因子,并发现可将该因子统一取为0.92。在此基础上,便可得出等离子体片外沿阿尔芬速度的大小。由于阿尔芬速度是由磁场强度和数密度共同决定的,而数密度可以由日冕偏振亮度(polarization Brightness: pB)测量反演给出。这样,最终便可根据观测的相速度求出日冕中等离子体片外沿区域的磁场强度。

上述这种根据日冕波动的性质来推断波传播媒介即日冕物理参数的方法就称为冕震学(coronal

seismology),与地震学中利用震波反演震区或传播区域性质的做法非常类似。由于目前仍没有飞船可以飞抵日冕实行就地测量,因此日冕的许多物理参数,特别是磁场的性质,都是通过间接方式获取的,这也体现了发展冕震学研究手段的重要性。

我们对图2中示出的两次事件均使用上述方法开展了冕震学研究,所得到的等离子片外沿区域的阿尔芬速度(V_{Ac})和磁场强度(B_e)分别在图6的左右分图中给出。由该图可知,两组参数都随着日心距离的增加而下降。其中,阿尔芬速度大体上由 $3 R_{\odot}$ 处的 $400 \sim 450 \text{ km/s}$ 下降至 $10 R_{\odot}$ 处的 200 km/s 左右,而磁场强度则相应由 $3 R_{\odot}$ 处的 $0.1 \sim 0.15$ 高斯下降至 $10 R_{\odot}$ 处的 $0.01 \sim 0.02$ 高斯,基本上可以认为磁场强度按照径向距离的平方反比率变化。另外,所给的两个相位 $P1$ 和 $P2$ 对应的阿尔芬速度和磁场强度在相同日心距离上随相位出现的先后顺序呈减小趋势。分析表明,在一个波动周期的时间($\sim 60 \sim 90 \text{ min}$)内,相同距离上阿尔芬速度与日冕磁场强度均有近15%的降低。这种下降被认为是CME扰动后的日冕参数恢复过程的观测表现。当然,日冕磁场不会无限制地降低下去,但由于我们仅观测到1~2个波长的冕流波,因而无法判断之后的磁场变化情况。为便于比较,图中用不同符号给出了文献中采用各种方式推断出的日冕磁场强

度分布,包括 Dulk & Mclean^[12] 采用射电暴数据诊断出的 $1.02 \sim 10 R_{\odot}$ 之间的磁场强度分布, Vršnak 等^[13] 和 Cho^[14] 根据 II 型射电暴频带分裂现象、Pätzold 等^[15]、Spangler^[16] 以及 Ingleby 等^[17] 根据射电信号的法拉第旋转现象计算出的磁场强度数值,还有最近 Ramesh 等^[18] 利用冕流中的低频圆偏振射电辐射信号推算出的数值。这些数值与我们的冕震学诊断结果基本一致。注意,图 6 中没有给出测量误差。根据前面给出的误差估算,阿尔芬速度数值

至少带有 $\pm 40 \text{ km/s}$ 的测量误差,而磁场强度数值的误差则非常难以估计。这主要是由于无法估计上述冕震学方法中引入的太阳风速度、数密度等多个物理量的测量误差;另外,扭曲模相速度与阿尔芬速度之间的定量关系是由简化情况下导出的线性色散关系分析给出的,这一过程所伴随的不确定性也将影响最终的诊断结果。需要指出的是,现阶段所有的冕震学方法都存在难以估算测量误差的窘境。

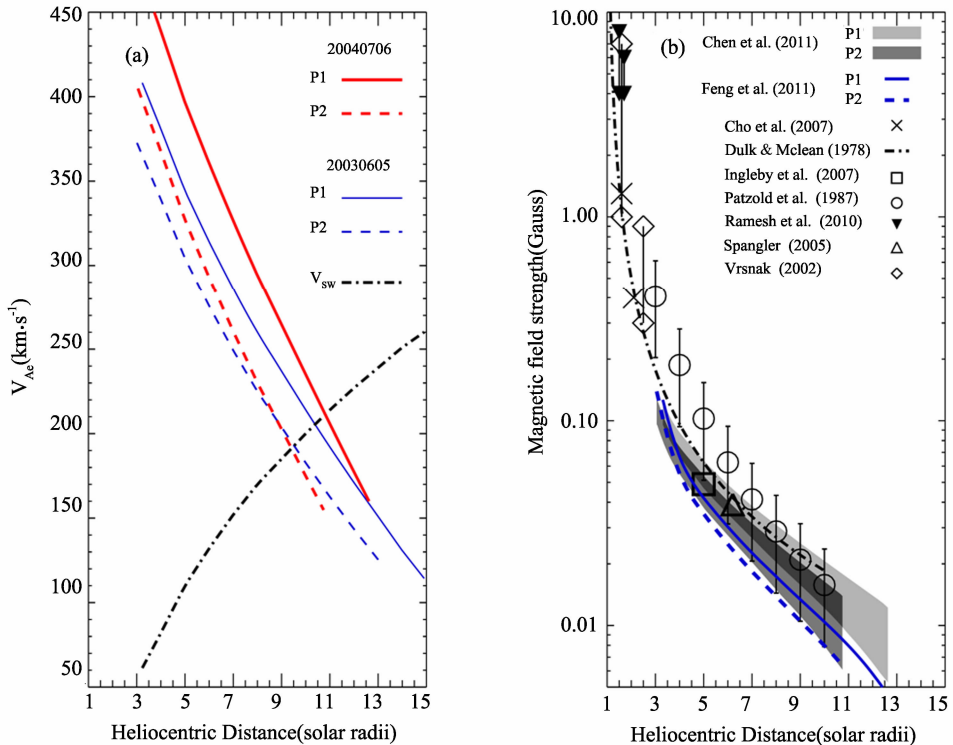


图 6 利用 20040706 和 20030605 两次冕流波事件开展的冕震学研究结果:沿冕流等离子体片外沿区域,即相位 P1 和 P2 传播路径上的阿尔芬速度 (a) 和磁场强度 (b) 的径向剖面。左图中点划线表示由沿等离子体片外流的冕流团速度测量给出的太阳风平均流速(取自^[4]);右图中的阴影区域表示 20040706 事件对应的磁场强度变化范围^[7],蓝色实(P1)和虚(P2)线表示 20030605 事件对应的平均磁场强度^[8],其他符号表示通过不同方式推断出的日冕磁场强度分布(见文中叙述)。

Fig. 6 Radial profiles of the estimated Alfvén speed (a) and magnetic field strength (b) in the region surrounding the streamer plasma sheet for the two streamer wave events observed on 6 July 2004 and 5 June 2003. The Alfvén speed profiles are given by the red (20040706) and blue (20030605) lines in (a) with the solid lines corresponding to P1 and dashed lines to P2. The shadow areas in (b) correspond to the variation ranges of the magnetic field strength for the 20040706 event^[7], and the solid (P1) and dashed (P2) blue lines are the average field strength for the 20030605 event^[8]. The black dot-dashed line in (a) presents the average blob speed taken from Wang et al.^[4]. Various symbols in (b) represent other estimates of the coronal magnetic field strength.

最后,根据图 6a 还可得出等离子体片外沿区域阿尔芬点的位置。阿尔芬点定义为太阳风速度与阿尔芬速度相等的位置,发现该点位于 $10 R_{\odot}$ 附近,此处太阳风速度与阿尔芬速度均为 200 km/s 左右。这与早年根据 Helios 飞船的数据分析得到的结果^[19] 也是一致的。

4 总结与讨论

本文综述了冕流波的发现和有关的研究结果。

冕流波是 CME 冲撞冕流结构激发的、沿等离子体片向外传播的大尺度日冕波动现象,为研究日冕波动提供了非常好的范例。Chen 等^[6] 首次报道了这种现象,并测量了波传播的相速度,指出了该现象在冕震学方面的潜在价值;Chen 等^[7] 又进一步发展了有关的冕震学方法,结合太阳风速度和数密度方面的观测限制,可利用波动特性诊断冕流等离子体片区域阿尔芬速度和磁场强度的变化情况,从而拓展了冕震学的研究和应用范围。

利用具有较好观测数据的 20030605 和

20040706 两例事件开展的冕震学方面的研究表明,两次事件中相同日心距上波的周期和波长相差不大,而且都随距离有逐渐增加的趋势;不同相位的相速度随相位出现的先后顺序而降低;两次事件中沿等离子体片外沿的阿尔芬速度和日冕磁场强度的变化趋势相似,均随相应相位出现的先后而减小。该趋势被认为是 CME 扰动后日冕状态恢复过程的表现。此外,还发现冕流区域太阳风的阿尔芬点处于大约 $10 R_{\odot}$ 处,速度在 200 km/s 左右。

在 Feng 等^[8]一文中,利用 SOHO \ LASCO 的 CME 事件列表,在第 23 太阳活动周内找到了 8 例较好的 CME-冕流摆动事件,其中 5 例被认定为冕流波事件。比较这些事件发现,导致冕流波激发的 CME 都具有很大的喷发速度和角宽度,CME 与冕流大都从侧面发生相互作用,且作用的最初位置大都位于 C2 视场的底部或下方,所有正面 CME 均伴有耀斑现象。这些共同观测特征为我们理解冕流波的激发条件提供了重要线索。但更深入的了解还需积累更多类似观测事件和开展专门的 CME-冕流相互作用的数值模拟研究。

冕流波现象是在 CME 与冕流相互作用的过程中激发形成的。除了冕流波现象外,CME 与冕流的相互作用还有许多其它方面的物理表现。例如,(1) 磁场极性分布合适时,在 CME 与冕流直接接触的区域可以触发磁场重联,或者 CME 的扰动可以诱发、驱动沿冕流上方电流片区域的磁场重联,这些重联过程会产生可以被日冕仪观测到的续发磁岛结构。因此,利用日冕仪的观测数据,可以研究 CME 与冕流相互作用有关的磁场重联过程。(2) CME 与冕流相互作用时,一方面,可以影响传播至冕流区域的激波性质,另一方面,同样速度的扰动,在冕流区域外面可能无法形成激波,而一旦进入冕流内部区域则很可能会超过当地的快模特征速度,从而转为激波结构。这一点是由冕流区域的低阿尔芬速度和低太阳风流速(在闭场区更无可观测的太阳风流动^[20])的物理属性所导致的。在日冕中,激波存在的主要观测依据就是所谓的 II 型射电暴,因此,通过分析 II 型射电暴的动态频谱观测数据,便可以了解 CME 与冕流相互作用过程中的某些具体物理过程及其对激波几何和强度等参数、电子加速与射电辐射过程的影响。(3) 上面已经提到,在 CME 与冕流相互作用的过程中,可能会在不止一处形成激波结构、诱发磁场重联过程,而激波和磁场重联均被认为与粒子(电子、质子等)加速和等离子体湍动的形成有关。因此,CME 与冕流相互作用过程中产

生的多重激波与多发磁重联现象的观测表现与所产生的物理后果,特别是这些过程能否产生和如何影响对空间天气至关重要的高能粒子事件(Solar Energetic Particles: SEPs),都是亟需解决的问题。这些不同的研究内容构成了 CME-冕流相互作用研究方向的多个课题分支,也是我们近年来一直在思考和探索的多项课题。

致谢:本工作得益于美国 NASA 和欧空局支持的 SOHO 卫星项目组所提供的高质量科学数据及其数据开放政策。

参考文献:

- [1] BRUECKNER G E, HOWARD R A, KOOMEN M J, et al. The large angle spectroscopic coronagraph[J]. *Solar Physics*, 1995, 162(1-2):357-402.
- [2] SHEELEY N R Jr, WANG Y M, HAWLEY S H, et al. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and 30 $R_{\text{sub sun}}$ [J]. *Astrophysical Journal*, 1997, 484(7):472-478.
- [3] HABBAL S R, WOO R, FINESCHI S, et al. Origins of the slow and the ubiquitous fast solar wind[J]. *Astrophysical Journal Letters*, 1997, 489(1):L103-L106.
- [4] WANG Y M, SHEELEY N R Jr, SOCKER D J, et al. The dynamical nature of coronal streamers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(11):25133-25142.
- [5] CROOKER N, JOSELYN J A, FEYNMAN J. Coronal mass ejections (Geophysics monograph) [M]. Washington: American Geophysical Union, 1997.
- [6] CHEN Y, SONG H Q, LI B, et al. Streamer waves driven by coronal mass ejections[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 714(1):644-651.
- [7] CHEN Y, FENG S W, LI B, et al. A coronal seismological study with streamer waves[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 728(2):147-152.
- [8] FENG S W, CHEN Y, LI B, et al. Streamer wave events observed in Solar Cycle 23 [J/OL]. *Sol. Phys.*, 2011, DOI 10.1007/s11207-011-9814-6
- [9] Edwin P M, Roberts B. Wave propagation in a magnetically structured atmosphere. III-The slab in a magnetic environment[J]. *Sol. Phys.*, 1982, 76:239-259.
- [10] CHEN Y, LI X, SONG H Q, et al. Intrinsic instability of coronal streamers [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 691(2):1936-1942.
- [11] SONG H Q, CHEN Y, LIU K, et al. Quasi-periodic releases of streamer blobs and velocity variability of the slow solar wind near the sun[J]. *Solar Physics*, 2009, 258(1):129-140.
- [12] DULK G A, MCLEAN D J. Coronal magnetic fields [J]. *Solar Physics*, 1978, 57:279-295.

- [13] Vršnak B, Magdalenic J, Aurass H, et al. Band-splitting of coronal and interplanetary type II bursts: II. Coronal magnetic field and Alfvén velocity [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2002, 396:673-682.
- [14] CHO K-S, LEE J, GARY D E, et al. Magnetic field strength in the solar corona from type II band splitting [J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 665:799-804.
- [15] Pätzold M, BIRD M K, VOLLAND H, et al. The mean coronal magnetic field determined from HELIOS Faraday rotation measurements [J]. *Solar Physics*, 1987, 109 (1):91-105.
- [16] SPANGLER S R. The Strength and structure of the coronal magnetic field [J]. *Space Science Reviews*, 2005, 121:189-200.
- [17] INGLEBY L D, SPANGLER S R, WHITING C A. Probing the large-scale plasma structure of the solar corona with faraday rotation measurements [J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 668:520-532.
- [18] RAMESH R, KATHIRAVAN C, SASTRY Ch V. Estimation of magnetic field in the solar coronal streamers through low frequency radio observations [J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 711(2):1029-1032.
- [19] PIZZO V, SCHWENN R, MARSCH E, et al. Determination of the solar wind angular momentum flux from the HELIOS data-an observational test of the Weber and Davis theory [J]. *Astrophysical Journal*, 1983, 271:335-354.
- [20] STRACHAN L, SULEIMAN R, PANASYUK A V, et al. Empirical densities, kinetic temperatures, and outflow velocities in the equatorial streamer belt at solar minimum [J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, 571 (2):1008-1014.

(编辑:李晓红)



陈耀,男,1993年考入中国科大地球与空间科学学院,1999年免试升为博士生,2001年获美国哈佛-史密松天体物理中心博士前奖学金(pre-doc fellowship)资助,在该处学研至完成博士论文,2004年回国获中国科大空间物理学博士学位,同时被聘为该校副教授,2005年曾赴哈佛大学短期学术访问。2007年初,作为特聘教授调入山东大学工作,现为山东大学空间科学研究院副院长,威海分校空间科学与物理学院副院长、教授、博士生导师。为中国地球物理学会空间天气学专业委员会委员,《空间科学学报》第七届编委会成员、美国天文学会、地球物理学会会员、AGU/SPA-Basu Award Committee 委员(2010-2012)、AGU-CIP (Committee on International Participation) 委员(2010-2012)等。曾获中科院优秀博士论文奖、全国百篇优秀博士论文奖、教育部新世纪优秀人才计划支持、第八届山东省青年科技奖、2008年度国家杰出青年基金项目资助、首届(2008)美国地球物理学会日地系统科学 Basu-Early career award、获评2008年度山东大学十大新闻人物等。发表第一(通讯)作者国际SCI论文20余篇,总SCI引用140余次,其中他引80余次。

研究兴趣:研究方向为空间物理与空间天气学,主要包括日冕与太阳风的加热与加速机制、太阳爆发现象如日冕物质抛射动力学、空间等离子体中的波动现象及相关的空间天气学应用研究。